

## МЕТОДИ СПЕКТРАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СТАНІВ КВАЗІСТАЦІОНАРНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРОМИСЛОВОСТІ

<sup>1</sup>В.Я. Піх, <sup>2</sup>Я.М. Николайчук, <sup>3</sup>Б.Б. Круліковський

<sup>1</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 727141,  
e-mail: v.pikh@pung.edu.ua

<sup>2</sup>Тернопільський національний економічний університет;  
46020, м. Тернопіль, вул. Львівська, 11

<sup>3</sup>Національний університет водного господарства та природокористування;  
33026, м. Рівне, вул. Соборна, 11, e-mail: kboris@ukr.net

Роботу присвячено перспективі застосування гармонічного аналізу на основі косинусного спектрального перетворення Фур'є для діагностування технологічних об'єктів у нафтогазовій промисловості.

Збільшення глибини буріння свердловин, геологічні умови сучасного буріння на нафту та газ диктують необхідність постійного удосконалення не лише технології буріння та нафтогазового обладнання, але й попередження аварійних ситуацій та удосконалення методів діагностування вузлів, механізмів, агрегатів тощо. Одним з таких параметрів, які потребують спектрального аналізу у процесі буріння є вібрації бурового інструмента.

Спектральний аналіз також широко використовують для діагностування глибоких насосів, підшипників компресорних агрегатів потужних електроприводів та вентиляторів та інші. Існуючу інформаційну технологію спектрального аналізу характеристик промислових об'єктів найчастіше реалізовано на основі відомого перетворення Фур'є в комплексній області та швидкого перетворення Фур'є на основі спецпроцесорів. Виконаний аналіз системних характеристик відомих програмно апаратних засобів обчислення спектрів свідчить про певну складність та обмежені функціональні можливості:

1. Необхідно виконувати операції над комплексними числами
2. Обмежене число каналів вихідних даних отриманого спектру.

В роботі пропонується застосування косинусного перетворення Фур'є, яке може бути виконане над дійсними цілими числами шляхом послідовного обчислення автокореляційної та в взаємкореляційної функцій, що дозволить реалізувати спецпроцесори з меншою апаратною складністю та підвищеною швидкістю.

Ключові слова: діагностування, нафтове обладнання, спектральні кореляції, аналіз Фур'є.

Работа посвящена перспективе применения гармонического анализа на основе косинусного спектрального преобразования Фурье для диагностики технологических объектов нефтегазовой промышленности.

Увеличение глубины бурения скважин, геологические условия современного бурения на нефть и газ диктуют необходимость постоянного совершенствования не только технологии бурения и нефтегазового оборудования, но и предупреждение аварийных ситуаций и усовершенствование методов диагностики узлов, механизмов, агрегатов и т.д. Одним из таких параметров, которые требуют спектрального анализа в процессе бурения являются вибрации бурового инструмента.

Спектральный анализ также широко используют для диагностики глубоких насосов, подшипников компресорных агрегатов мощных электроприводов и вентиляторов и прочее. Существующая информационная технология спектрального анализа характеристик промышленных объектов зачастую реализовано на основе известного преобразования Фурье в комплексной области и быстрого преобразования Фурье на основе спецпроцессоров.

Выполнения анализа системных характеристик известных программно аппаратных средств вычисления спектров, показывает их определенную сложность и ограниченные функциональные возможности:

1. Необходимо выполнять операции над комплексными числами
2. Ограниченное число каналов исходных данных полученного спектра.

В работе предлагается применение косинусного преобразования Фурье которое может быть выполнено над действительными целыми числами путем последовательного вычисления автокорреляционной и в взаимокорреляционной функций, что позволит реализовать спецпроцессора с меньшей аппаратной сложностью и повышенным быстродействием.

Ключевые слова: диагностирование, нефтяное оборудование, спектральные корреляции, анализ Фурье.

The work is focused on the application for harmonic analyses based on cosine transform spectral for Fourier diagnosing process facilities in the oil and gas industry.

Increasing the drilling depth of a well, geological conditions of modern oil and gas drilling dictate the need to improve not only drilling technology and equipment, but also to prevent accidents and improve methods for diagnosing components, mechanisms, assemblies. One of the parameters that requires spectral analysis in the process of drilling is drilling tool vibration.

Spectral analysis is widely used to diagnose deep pumps, bearings, compressor units, powerful motors and fans. Existing information technology of the spectrum analysis of industrial facilities characteristics is often implemented on the base of the Fourier transform in the complex domain and the FFT on the base of special processors. The analysis of system characteristics, known hardware and software computing spectrum shows some complexity and limited functionality:

1. Necessary to perform operations on complex numbers
2. Limited number of output channels in obtained spectrum.

The paper proposes the usage of cosine Fourier transform that can be performed on valid whole numbers successively computing autocorrelation and mutual correlation functions that will implement special processors with less hardware complexity and higher speed.

Key words: diagnosis, petroleum equipment, spectral correlation, Fourier analysis.

## Вступ

Теорію спектрального аналізу викладено у фундаментальних роботах, Н. Вінера-Хінчина, А. М. Колмогорова, В.К. Задіраки, та інших вчених. У той же час реалізація програмно апаратних засобів спектрального аналізу далека від досконалості і не повною мірою відповідає сучасним вимогам, досягнення низької апаратної та часової складності. Це пов'язано, у першу чергу, з великою обчислювальною складністю, реалізацією алгоритмів спектрального аналізу на основі відомого комплексного перетворення Фур'є та швидких перетворень Фур'є.

Використання косинусного перетворення Фур'є в практиці створення засобів спектрального аналізу набуло набагато меншого поширення у зв'язку з необхідністю послідовного обчислення автокореляційної та взаємкореляційної функцій, що потребує центрування та нормування вхідних сигналів, а також виконання множення та сумування добутків чисел з різними знаками. При цьому існуючий досвід побудови швидкодіючих процесорів та сучасної мікроелектронної елементної бази обумовлює актуальність створення процесорів косину-

сного перетворення Фур'є для спектрального аналізу та діагностування на його основі складних об'єктів в нафтогазовій промисловості.

**Аналіз публікацій і окреслення наукової задачі.** Сучасні методи та інформаційні технології діагностування технологічних об'єктів у нафтогазовій промисловості, викладені в [1, 2], охоплюють класи стаціонарних процесів і не можуть бути адаптовані до квазістаціонарних об'єктів, наприклад, бурових установок, резервуарних парків, нафтогазопроводів тощо. Прикладом успішного застосування спектрального аналізу для діагностування глибинних насосів викладено у роботах Л. М. Заміховського та В. П. Калявіна [2].

Процес буріння характеризується квазістаціонарними властивостями, які полягають у тому, що при зміні режимів буріння або властивостей порід, що розбурюються стрибкоподібно, змінюються статистичні характеристики контрольованих процесів навантаження на долото та проходки (рис. 1.)

Такі властивості процесу буріння передбачають оперативні операції обчислення автоко-

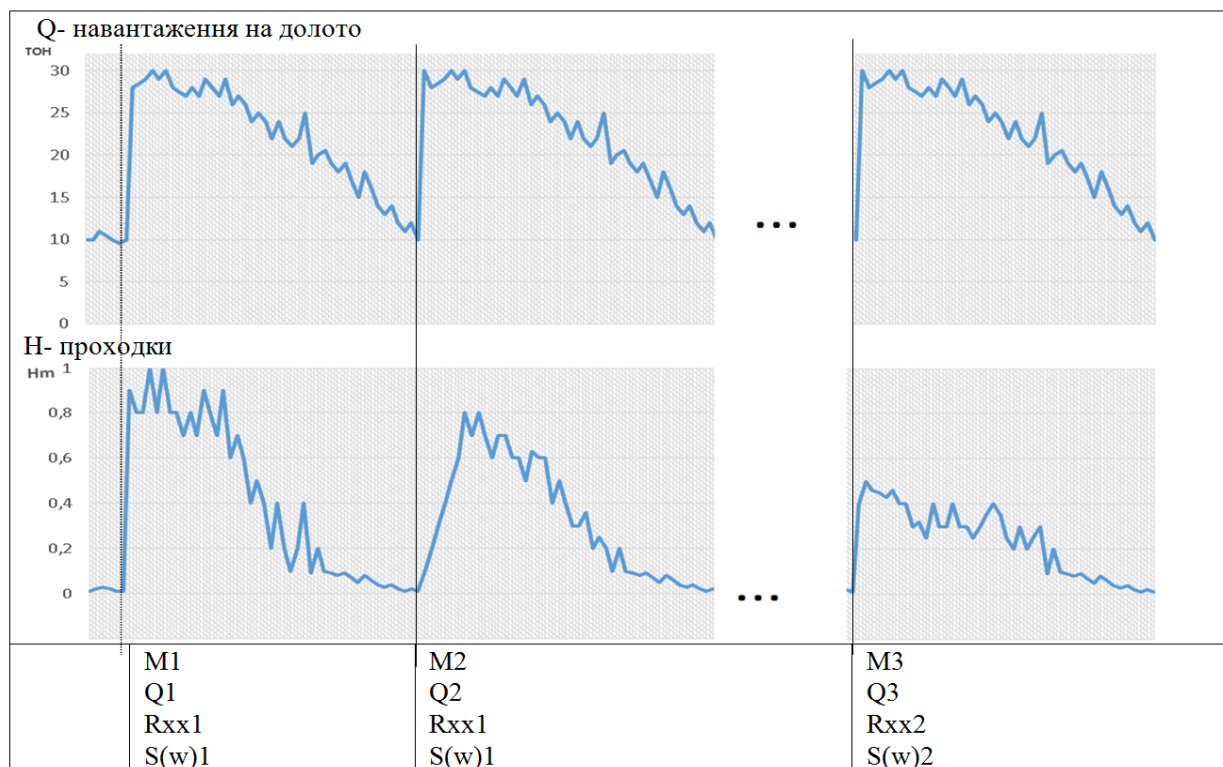


Рисунок 1 – Часова діаграма квазістаціонарної характеристики процесу буріння

реляційної функції ковзного математичного сподівання  $Mx$  та дисперсії  $Dx$ , а також обчислення у реальному часі автокореляційної  $R_{xx}$  та спектральної характеристики  $S(w)$ . Тому задача побудови високопродуктивних спектральних аналізаторів є актуальними.

Методи рішення проблеми діагностування складних технологічних об'єктів на основі логіко-статистичних кореляційних та кластерних моделей, які передбачають попереднє статистичне та спектральне опрацювання сигналів викладені в роботах [4]. В [5] розроблені методи побудови інтелектуальних систем діагностування компонентів комп'ютерних систем, які недостатньо повно відображають моделі складних багатопараметричних об'єктів, які є джерелами інформації для діагностичних систем.

Таким чином аналіз системних характеристик відомих методів обчислення спектрів та їх застосування свідчить про певну складність та обмеженні функціональні можливості.

При цьому у першому випадку необхідно виконувати операції над комплексними числами [6].

А у другому це обмежене число каналів вихідних даних отриманого спектру [7, 8].

Такий клас задач може бути успішно вирішений застосуванням косинусного перетворення Фур'є та розробкою відповідних швидкодіючих процесорів опрацювання сигналів, що є актуальною науковою прикладною задачею.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є розробка теоретичних засад методів та алгоритмів дискретного косинусного перетворення Фур'є на основі аналітики та асимптотики різних автокореляційних та взаємкореляційних функцій.

Застосування кореляційних та спектральних моделей джерел інформації (ДІ), які інтегрально характеризують стани об'єктів управління (ОУ) з урахуванням ймовірності переходів станів з одного в інший, є перспективним інструментом вдосконалення технологічних процесів діагностування складних ОУ нафтогазової промисловості.

### Виклад основного матеріалу

Будь-яка функція визначена на скінченному інтервалі і задовольняє умовам Діріхле:

1. Функція має скінченну кількість точок розриву першого роду і скінченну кількість екстремумів.

2. Існує скінченна границя значень функції на її лівому та правому кінцях

3. Існує відповідний дискретний ряд Фур'є, який описується виразом:

$$f(x) = \frac{a_n}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n x + b_n \sin \omega_n x), \quad (1)$$

де  $a_n = \frac{1}{l} \int_0^l f(x) \cos \omega_n x dx$ ,  $b_n = \frac{1}{l} \int_0^l f(x) \sin \omega_n x dx$  -

коефіцієнти ряду Фур'є ;

$$\omega_n = \frac{\pi n}{l} - \text{частота } n\text{-ої гармоніки.}$$

Тому дослідження та розвиток методів спектрального аналізу на основі косинусного перетворення Фур'є є соціально науковою задачею.

Незважаючи на широку сферу та успішне застосування спектрального аналізу при вирішенні різних теоретичних та прикладних задач, в основу його базової теорії покладено спектральне перетворення Фур'є.

Значні функціональні обмеження обчислювальних процесів перетворення Фур'є та слабка збіжність рядів Фур'є призвели до розвитку та успішного застосування інших теоретико-числових базисів (ТЧБ) для обчислення спектрів сигналів. При цьому для вдосконалення характеристик спецпроцесорів необхідно розв'язати задачу сумісного застосування теорії кореляційних функцій та базисних функцій різних ТЧБ шляхом адаптації базисних функцій до асимптотики кореляційних функцій досліджуваних сигналів.

### Системи ортогональних функцій та теоретико-числові базиси

Найбільш широко застосовуваними ТЧБ в сучасній КС є наступні ортогональні базиси: Радемахера, Хаара, Крестенсона.

Зокрема, базисами для виконання дискретних ортогональних перетворень і дискретного подання одновимірної інформаційного потоку зі скінченною енергією, визначеного в просторі  $L_2[a,b]$  на основному інтервалі  $T=[a,b]$ , є повні ортонормовані системи функцій (табл. 1).

Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) є базовим алгоритмом цифрової обробки сигналів у частотній області. Завдяки наявності ефективних алгоритмів його обчислення – алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) – ДПФ широко використовується для цілей цифрової фільтрації та спектрально-кореляційного аналізу сигналів.

Для сигналу, заданого у вигляді дискретної послідовності  $S(n)$ , пряме й обернене дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) має вигляд [5]:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp \left[ -j \frac{2\pi nk}{N} \right], k = \overline{0, N-1}, \quad (2)$$

$$S(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S(k) \exp \left[ j \frac{2\pi nk}{N} \right], n = \overline{0, N-1}, \quad (3)$$

де  $k$  – номер гармоніки із частотою  $f_k$ ,

$N$  – обсяг вибірки.

$S(k)$ , визначений як комплексний спектр сигналу, можна представити

$$S(k) = A(k) - jB(k) = C(k)e^{-j\varphi(k)}, \quad (4)$$

де амплітудно-частотна (АЧХ) і фазо-частотна характеристика (ФЧХ) сигналу відповідно визначаються:

$$C(k) = \sqrt{A^2(k) + B^2(k)}; \quad (5)$$

$$\varphi(k) = \arctg \frac{B(k)}{A(k)} + 2\pi m. \quad (6)$$

Таблиця 1 – Ортонормовані системи функцій

	ТЧБ Радемахера	
	Структура функцій	Породжуюча кодова матриця
1	$Rad(0,\theta)$	$Rad(0,\theta) \rightarrow 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0$
	$Rad(1,\theta)$	$Rad(1,\theta) \rightarrow 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1$
	$Rad(2,\theta)$	$Rad(2,\theta) \rightarrow 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1$
	$Rad(3,\theta)$	$Rad(3,\theta) \rightarrow 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1$
	$s$	$s \rightarrow 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7$
	Аналітичний вираз функцій	$Rad(n,\theta) = Dyf(n,\theta,0) = sign(\sin(2^n \pi \theta))$
	ТЧБ Хаара	
	Структура функцій	Породжуюча кодова матриця
2	$Har(0,\theta,0)$	
	$Har(1,\theta,0)$	
	$Har(2,\theta,1)$	
	$Har(2,\theta,2)$	
	$Har(3,\theta,1)$	
	$Har(3,\theta,2)$	
	$Har(3,\theta,3)$	
	$Har(3,\theta,4)$	
	Аналітичний вираз функцій	$Har(n,\theta,j) = \begin{cases} 2^{\frac{n-1}{2}} sign(\sin 2^n \pi \theta), & \frac{j}{2^{n-1}} \leq \theta < \frac{j+1}{2^{n-1}}, \\ 0 & \text{при інших } \theta \in [0,1), \end{cases}$ <p>де <math>n = 0,1,\dots,\log_2 N</math>; <math>j = 0,1,\dots,2^{n-1} - 1</math>; (<math>j = 0</math> при <math>n = 0</math>), <math>0 \leq \theta &lt; 1</math>.</p>
	ТЧБ Крестенсона	
	Структура функцій	Породжуюча кодова матриця
3	$Cr(2,\theta)$	$Cr(2,\theta) \rightarrow 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1$
	$Cr(3,\theta)$	$Cr(3,\theta) \rightarrow 0 \ 1 \ 2 \ 0 \ 1 \ 2$
	$Cr(4,\theta)$	$Cr(4,\theta) \rightarrow 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 0 \ 1$
	$Cr(5,\theta)$	$Cr(5,\theta) \rightarrow 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 0$
	$s$	$s \rightarrow 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ \dots$

Обчислення перетворень Фур'є вимагає дуже великого числа множень (приблизно  $N^2$ ) і обчислень синусів. Існує спосіб виконати ці перетворення значно швидше: приблизно за  $N \cdot \log_2 N$  операцій множення. Цей спосіб називається швидким перетворенням Фур'є [5].

Алгоритм ШПФ – це спосіб швидкого обчислення ДПФ  $X(jk) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j(2\pi/N)kn}$ , що дозволяє усунути притаманну ДПФ надмірність. Вони ґрунтуються на властивостях комплексної експоненти  $e^{-j(2\pi/N)kn}$ , для зручності позначають  $W_N^{kn}$  ( $W_N^{kn} = e^{-j(2\pi/N)kn}$ ), її симетрії  $W_N^{(N-k)n} = W_N^{(N-k)n} = (W_N^{kn})^*$  і періодичності  $W_N^{(N+k)(N+n)} = W_N^{kn}$  з періодом, рівним довжині

оброблюваної реалізації сигналу  $N$  (числу точок ШПФ). Відповідно до останньої властивості експоненти  $W_N^{pkn} = W_{N/p}^{kn}$  відповідає період  $N/p$ , де  $p$  – цілі числа, на які ділиться  $N$ . Використання даних властивостей в алгоритмах ШПФ виключає велике число повторюваних при обчисленні ДПФ операцій множення.

У теорії гармонійного аналізу випадкових процесів визначено, що кореляційна функція і спектральна щільність становлять пару перетворень Фур'є, відому під назвою теорема Вінера-Хінчина: [цифрова обробка сигналів 2-га частина].

Теорема Вінера-Хінчина, визначає взаємозв'язок частотного спектра потужності випадкового процесу  $G(w)$  з функцією автокореляції  $G(\Delta t)$  цього процесу, де при тимчасовій

частоті  $w$  процесу  $\Delta t$  має сенс деякої часового затримання.

Формулу Вінера-Хінчина можна також виразити через косинус-перетворення Фур'є. Легко показати, що коваріаційна функція і спектральна щільність симетричні,  $R_x(\tau) = R_x(-\tau)$  та  $R_X(s) = R_X(-s)$ . Використовуючи формулу Ейлера, отримують:

$$R_X(s) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau = 2 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau, \quad (7)$$

$$R_X(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\omega) \cos \omega \tau d\omega =$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R_X(\omega) \cos \omega \tau d\omega. \quad (8)$$

У загальному випадку спектр сигналу на основі нормованої автокореляційної функції визначається за допомогою виразу:

$$S_w = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \rho_{xx}(j) \cdot w_j \cdot e^{-\alpha \cdot j}, \quad (9)$$

де  $w_j$  – цифрові відліки базисних функцій різних ТЧБ;  $\alpha$  – коефіцієнт затухання дисперсії кореляційних функцій;

$$\rho_{xx}(j) = \frac{R_{xx}(j)}{D_x} - \text{нормована автокореляційна функція досліджуваного процесу;}$$

$$R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n x_i \cdot x_{i+j} - \text{функція автокореляції;}$$

$x_i = x_i - M_x$  – центровані значення станів ДІ ( $x_i$ );

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \text{вибіркове математичне}$$

сподівання;

$$D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2 - \text{дисперсія.}$$

За допомогою вагової функції  $e^{-\alpha \cdot j}$  ліквідується ефект появи «від'ємних» гармонік різних ТЧБ в спектрах. Причому число точок  $m$  нормованої автокореляційної функції  $\rho_{xx}(j)$ , вибирається згідно умови інтервалу кореляції, при  $j \geq m$ ,  $|\rho_{xx}(j)| \leq 0.01$ .

Розглянемо аналітичні вирази кореляційних функцій, що використовуються для реалізації спецпроцесорів (таблиця 2).

З табл. 2 видно, що найменшою алгоритмічною складністю характеризуються функції еквівалентності  $F_{xx}(j)$  та  $F_{xy}(j)$ , в яких базисна операція згортки виконується шляхом порівняння модульних значень  $x_i, \dots, x_{i+j}$  та сумування менших з них, що визначає взаємодію кореляційних приймачів ( $C_{xy}$ ,  $G_{xy}$ ,  $F_{xy}$ ), які реалізовані у вигляді спецпроцесорів в унітарному ТЧБ.

Таблиця 2 – Аналітичні вирази кореляційних функцій

№	Кореляційна функція
1	<p>знакова</p> <p>Автокореляційна функція</p> $H_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(x_i) \times \text{sign}(x_{i+j})$ <p>Взаємкореляційна функція</p> $H_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(x_i) \times \text{sign}(y_{i+j})$
2	<p>релейна</p> <p>Автокореляційна функція</p> $B_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times \text{sign}(x_{i+j})$ <p>Взаємкореляційна функція</p> $B_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times \text{sign}(y_{i+j})$
3	<p>коваріаційна</p> <p>Автокореляційна функція</p> $K_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times x_{i+j}$ <p>Взаємкореляційна функція</p> $K_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times y_{i+j}$
4	<p>Кореляційна</p> <p>Автокореляційна функція</p> $R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times x_{i+j}$ <p>Взаємкореляційна функція</p> $R_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times y_{i+j}$
5	<p>Нормована кореляційна</p> <p>Автокореляційна функція</p> $\rho_{xx}(j) = \frac{R_{xx}(j)}{D_x}$ <p>Взаємкореляційна функція</p> $\rho_{xy}(j) = \frac{R_{xy}(j)}{\sqrt{D_x \times D_y}}$
6	<p>структурна</p> <p>Автокореляційна функція</p> $C_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+j})^2$ <p>Взаємкореляційна функція</p> $C_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_{i+j})^2$

Продовження таблиці

7	модульна Автокореляційна функція $G_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  x_i - x_{i+j} $
	Взаємкореляційна функція $G_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  x_i - y_{i+j} $
8	еквівалентності Автокореляційна функція $F_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Z}_{xx}$
	Взаємкореляційна функція $F_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Z}_{xy}$

$sign(\overset{\circ}{x}_i), sign(\overset{\circ}{y}_{i+j})$  – знаки центрованих значень;

$M_x, M_y$  – математичні сподівання;

$D_x, D_y$  – дисперсії;

$\tilde{Z}_{xx}, \tilde{Z}_{xy}$  – елементи кореляційної еквівалентності.

Матрицю базисних функцій для розрахування спектрів в різних ТЧБ Фур'є наведено у таблиці 3.

**Таблиця 3 – Базисні функції для розрахування спектрів в ТЧБ Фур'є**

	Fr
$H_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n sign(\overset{\circ}{Hxx}(j)) \times sign(\overset{\circ}{fr}(j))$
$B_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_{xx} \times sign(\overset{\circ}{fr}(j))$
$K_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{xx}(j) \times fr(j)$
$R_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overset{\circ}{Rxx}(j) \times \overset{\circ}{fr}(j)$
$p_{xx}$	$S(w) = \frac{P_{xx}(j)}{D_x}, fr(j)$
$C_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{xx}(j) - fr(j))^2$
$G_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  G_{xx}(j) - fr(j) $
$F_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Z}_{xx} \frac{F_{xx}}{M_{xx}}, fr(j)$

Матрицю базисних функцій для розрахування спектрів в ТЧБ Хаара наведено у таблиці 4.

**Таблиця 4 - Базисні функції для розрахування спектрів в ТЧБ Хаара**

	Har
$H_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n sign(\overset{\circ}{Hxx}(j)) \times sign(\overset{\circ}{har}(j))$
$B_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_{xx} \times sign(\overset{\circ}{har}(j))$
$K_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{xx}(j) \times har(j)$
$R_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overset{\circ}{Rxx}(j) \times \overset{\circ}{har}(j)$
$p_{xx}$	$S(w) = \frac{P_{xx}(j)}{D_x}, har(j)$
$C_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{xx}(j) - har(j))^2$
$G_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  G_{xx}(j) - har(j) $
$F_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Z}_{xx} \frac{F_{xx}}{M_{xx}}, har(j)$

Матрицю базисних функцій для розрахування спектрів в ТЧБ Радемахера наведено у таблиці 5.

**Таблиця 5 – Базисні функції для розрахування спектрів в ТЧБ Радемахера**

	Rad
$H_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n sign(\overset{\circ}{Hxx}(j)) \times sign(\overset{\circ}{rad}(j))$
$B_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_{xx} \times sign(\overset{\circ}{rad}(j))$
$K_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{xx}(j) \times rad(j)$
$R_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overset{\circ}{Rxx}(j) \times \overset{\circ}{rad}(j)$
$p_{xx}$	$S(w) = \frac{P_{xx}(j)}{D_x}, har(j)$
$C_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{xx}(j) - rad(j))^2$
$F_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Z}_{xx} \frac{F_{xx}}{M_{xx}}, rad(j)$



Матрицю базисних функцій для розрахування спектрів в ТЧБ Крестенсона наведено у таблиці 6.

**Таблиця 6 – Базисні функції для розрахування спектрів в ТЧБ Крестенсона**

	Cr
$H_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(H_{xx}(j)) \times \text{sign}(cr(j))$
$B_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_{xx} \times \text{sign}(cr(j))$
$K_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{xx}(j) \times cr(j)$
$R_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{xx}(j) \times cr(j)$
$p_{xx}$	$S(w) = \frac{P_{xx}(j)}{D_x}, cr(j)$
$C_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{xx}(j) - cr(j))^2$
$G_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  G_{xx}(j) - cr(j) $
$F_{xx}$	$S(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Z}_{xx} \frac{F_{xx}}{M_{xx}}, cr(j)$

### Висновок

Викладені теоретичні засади та методологія реалізації дискретного перетворення Фур'є на основі оцінок різних кореляційних функцій є основою для реалізації відповідних алгоритмів спектрального діагностування станів обладнання нафтогазової промисловості за допомогою універсальних комп'ютерів, спеціалізованих контролерів та сигнальних процесорів, які випускаються відомими фірмами CMS, SPM, COMPAS, SCHENCK.

Враховуючи велику вартість таких програмно апаратних засобів «більше 20 тис. у.о.», перспективними і актуальним є розробка спец процесорів косинусного перетворення Фур'є на типових платформах та кристалах фірм «ANALOG DEVICE» та «KSANIKS». Які повинні бути адаптовані до умов експлуатації об'єктів нафтогазової промисловості

### Література

- 1 Заміховський Л.М. Основи теорії надійності і технічної діагностики систем: навч. посіб. / Л.М. Заміховський В.П. Калявін. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2004. – 360 с.
- 2 Заміховський Л.М. Проектування систем діагностування: навч. посіб. / Л.М. Заміховський В.П. Калявін. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2004. – 248 с.
- 3 Николайчук Я.М. Теорія джерел інформації / Я.М. Николайчук. – Тернопіль: ТзОВ «Терно-граф», 2010. – 536 с.
- 4 Ширмовська Н.Г. Застосування кореляційного та кластерного аналізу для ідентифікації перед аварійних та аварійних станів процесів буріння / Н.Г. Ширмовська, І.Б. Албанський, І.Р. Пітух, О.Л. Кулинин // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2011. – № 3(29). – С. 112-116.
- 5 Задирака В. К. Теория вычисления преобразования Фурье / В.К. Задирака. – К.: Наук. думка, 1983. – 216 с.
- 6 Нуссбаумер Г. Быстрое преобразования Фурье и алгоритм вычисления сверток / Г. Нуссбаумер; [пер. с англ.]. – М.: Радио и связь, 1985. – 248 с.
- 7 Мельник А.О. Персональні суперкомп'ютери: архітектура, проектування, застосування: монографія / А. О. Мельник. – Львів: Видавництво Львівської Політехніки, 2013. – 516 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
24.04.14

Рекомендована до друку  
професором **Юрчишиним В.М.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Кочаном В.В.**  
(Тернопільський національний економічний  
університет, м. Тернопіль)